

레이저 용접의 키홀 발생 기구

Mechanism of Keyhole Formation in Laser Welding

고성훈*, 이재영**, 유중돈**

* 현대중공업 산업기술연구소

** 한국과학기술원 기계공학과

1. 서론

레이저 용접은 높은 에너지 밀도로 인하여 가공 속도가 증가하고 용융부와 열영향부가 감소하므로 용접부의 잔류 응력과 열변형을 감소시키는 장점이 있다. 레이저 용접은 용융부 표면에서 용융 금속의 증발 압력(recoil pressure)에 의해 키홀(keyhole)이 발생하여 깊은 용입을 얻을 수 있다. 키홀의 형성과 관련된 힘은 용융 금속의 표면장력에 의한 압력과 정수압, 금속의 증발 압력 등이며, 역제동 복사(inverse bremsstrahlung) 및 키홀 벽면의 흡수 등을 고려한 해석이 필요하다[1]. 기존의 연구 결과들로부터 다중반사에 의한 흡수율과 증발 압력이 키홀 형성에 큰 영향을 주는 사실을 확인할 수 있지만[2,3], 유동이 키홀의 안정성에 미치는 영향이나 키홀이 불안정하게 되는 원인에 대한 연구가 미흡하였다. 본 연구에서는 수치해석 방법을 이용하여 키홀 형성과 안정성에 대하여 해석하고, 키홀이 불안정한 상태로 붕괴되는 원인을 규명하고자 한다.

2. 다중 반사와 증발 압력

키홀 내부로 입사된 레이저 빔은 벽면에 여러 번에 걸쳐 반사되어 흡수율이 증가하는 효과를 얻는다. 용융된 키홀의 벽면은 경면과 유사하므로 입사각과 반사각은 동일하며, 레이저 빔의 이동 경로는 ray tracing 방법을 이용하여 계산할 수 있다. 본 연구에서는 모재 표면에 수직으로 입사하는 레이저 빔의 경로를 추적하여 다중 반사에 의해 키홀 벽면에서 누적되는 입열량을 계산하였으며, 레이저 빔의 분산(divergence)은 고려하지 않았다. 레이저 빔은 키홀 내부에 존재하는 금속 증기와 플라즈마에 의해 흡수되지만, 본 연구에서는 이러한 영향은 무시하였다. 키홀 벽면에서 레이저 빔이 흡수되는 정도는 온도, 파장, 편광, 입사 각도 등에 의해 영향을 받아 매우 복잡하게 변화하지만, 본 연구에서는 20%의 일정한 흡수율을 사용하여 입열량을 계산하였다.

용융 금속의 증발 압력은 실험으로 측정하기 곤란하므로 일반적으로 이론적으로 계산한 값을 사용한다. 본 연구에서는 Clapeyron-Clausius의 식으로부터 유도된 아래의 증발 압력을 사용하였다[4].

$$P_r = 0.54 P_o \exp\left(h_{fg} \frac{T - T_{lv}}{RTT_{lv}}\right) \quad (1)$$

이때, P_o 는 대기압, h_{fg} 는 기화 잠열의 엔탈피(enthalpy), R 은 기체상수, T_{lv} 는 금속의 증발 온도를 나타낸다. 키홀 표면의 온도로부터 식(1)을 이용하여 증발 압력을 계산할 수 있으며, 계산된 증발 압력은 키홀 표면에 경계조건으로 주어진다.

키홀의 형상을 계산하기 위하여 Volume of Fluid 방법을 사용하였으며[5], 축대칭 형상의 정지 상태인 레이저 용접부 형상에 대하여 용융부의 유동 및 온도 분포를 수치적으로 계산하였다. 계산에 사용된 레이저 출력은 200, 500, 2000 Watt이며, 레이저 빔 반경은 0.3mm이고 TEM₀₀모드인 Gaussian 분포의 레이저 빔이 모재면에 수직인 방향으로 조사된다고 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

출력 200W이고 반경 0.3mm인 레이저에 대해서 용융부를 해석한 결과를 Fig.1에 나타내었다. 레이저의 출력이 낮기 때문에 자유 표면 중심이 내부로 약간 밀리지만, 키홀과 다중 반사는 발생하지 않고 열전도 모드(conduction mode)에 의해 GTA용접과 유사한 형태의 용융이 발생하였다. 용융부 유속이 작기 때문에 유동이 용융부 형상에 미치는 영향도 작다.

동일한 조건에서 레이저의 출력을 500W로 증가시켜 계산한 결과를 Fig.2에 나타내었다. 약 10ms 경과 후에 키홀이 형성되기 시작하며, 키홀의 중심부에서 바깥으로 향하는 유동이 발생하여 용융금속은 외곽으로 배출된다. 12.5ms 이후 외곽으로 배출된 용융 금속은 불룩한 형상을 이루어 표면 장력에 의한 압력으로 증발 압력에 의해 외부로 배출되는 유동을 방해한다. 용융부의 크기가 증가할수록 증발 압력과 정수압 및 표면 장력에 의한 압력으로 용융부는 진동하며 불안정하게 된다. 13.2ms 이후 키홀 상부에 모인 용융금속의 돌출부는 키홀 내부로 이동하여 결국 키홀 붕괴가 일어나고 기공이 발생한다. 이러한 키홀 붕괴는 증발 압력에 의해 용융 금속이 외부로 안전하게 배출되지 못하였기 때문이다.

레이저 빔의 출력을 2kW로 증가시킨 경우의 결과를 Fig.3에 나타내었다. 높은 에너지 밀도로 인하여 1ms 이후 키홀이 발생하며, 다중 반사에 의해 키홀 중심부의 온도가 매우 높아진다. 키홀 중심부에서 높은 증발 압력에 의해 용융 금속이 외곽으로 배출되므로 용융부 두께는 매우 얇아지며, 열전도에 의한 중심부의 용융이 빠르게 발생하여 용입은 0.7mm이상 증가한다. 3.7ms경과 이후, 표면 장력에 의한 중심부로 향하는 유동과 증발 압력에 의한 바깥 방향으로 배출되는 유동이 상쇄되는 깊이 0.5mm 부근에서 돌출부가 발생하고, 증발 압력에 의하여 중심부로 밀리지만 기공이 발생하지는 않는다. 3.8ms 이후 깊이 0.4mm 부근에서 새로운 돌출부가 발생하여 키홀이 붕괴되고 기공이 발생하였다.

키홀 벽면에서 이러한 돌출부가 생성되는 원인을 규명하기 위하여 레이저 출력 2kW의 조건에서 시간에 따라 변화하는 키홀 벽면에 흡수된 입열량을 Fig.4에 나타내었다. 키홀 깊이에 따라 입열량은 크게 변화하며, 이에 따라 키홀 표면의 온도와 증발 압력도 변화한다. 단위 면적당 입열량이 낮은 지점과 Fig.3의 돌출부가 발생하는 위치는 대략 일치하므로 돌출부는 키홀 내부의 용융 금속이 완전히 외부로 배출되지 못하는 경우에 불균일한 입열량에 의해 발생하는 것으로 추정된다. 하지만 이러한 추론은 키홀 내부에 존재하는 금속 증기와 플라즈마의 영향을 고려하지 않은 경우에 해당하는 것으로, 고온의 금속 증기에 의해 발생한 압력과 유동은 키홀을 안정시키는 역할을 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

키홀의 다중 반사와 열유동 해석을 통하여 키홀의 발생 및 붕괴 기구에 대하여 분석하였으며, 계산 결과는 다음과 같다.

- (1) 증발 압력에 의해 키홀은 형성되며, 키홀의 깊이가 증가함에 따라 정수압과 표면 장력에 의한 압력 증가로 인하여 증발 압력은 용융 금속을 키홀 외부로 완전히 배출시키지 못한다.
- (2) 키홀은 불안정하며 키홀 벽면의 불균일한 증발 압력의 분포로 인하여 돌출부가 발생하여 붕괴된다. 저출력 레이저의 경우 돌출부는 키홀의 상부에서 발생하며, 고출력 레이저인 경우에는 키홀의 중간 부분에서 발생한다.
- (3) 키홀 내부에 존재하는 고온의 금속 증기와 플라즈마의 압력 및 유동이 키홀의 안정성을 증가시킬 것으로 추정되며, 향후 이를 고려한 해석이 요구된다.

참고 문헌

1. 김도훈 : 레이저 가공학, 1990
2. Dowden J., Kapadia P. and Postacioglu N.: An analysis of the laser-plasma interaction in laser keyhole welding , *Journal of Physics D : Applied Physics*, 22(1989), pp.741-749
3. Kaplan A.: A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile , *Journal of Physics D : Applied Physics*, 27(1994), pp.1805-1814
4. von Allmen M., Blatter M. : *Laser-beam interactions with materials*, 2nd ed., Springer, 1995
5. 고성훈, 최상균, 유중돈 : GTA용접에서 용융풀의 표면 변형이 유동과 진동에 미치는 영향, *대한용접학회지*, 17-6(1999), pp.70-77

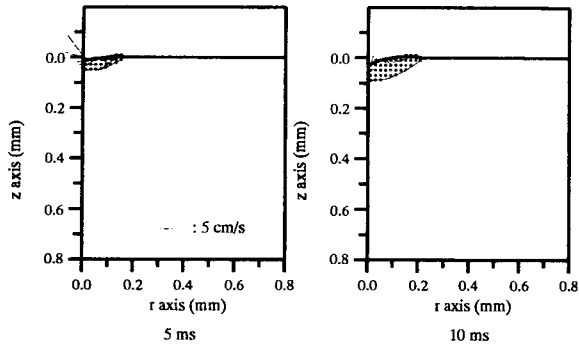


Fig.1 Surface profile and flow pattern for 200W laser

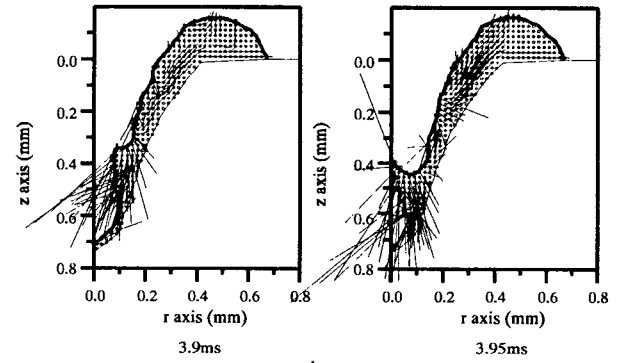
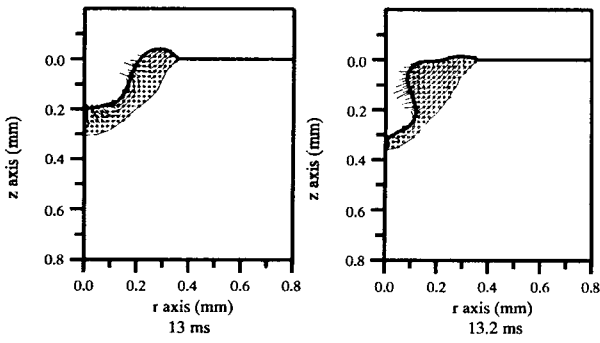
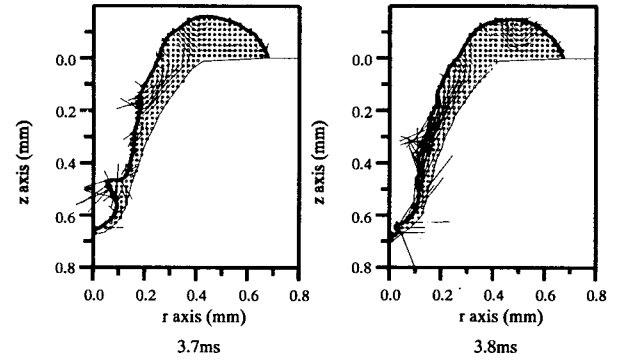
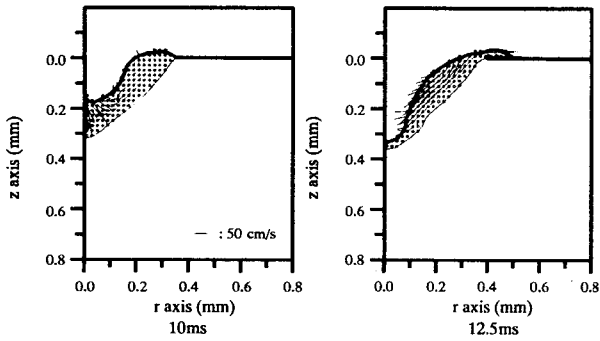
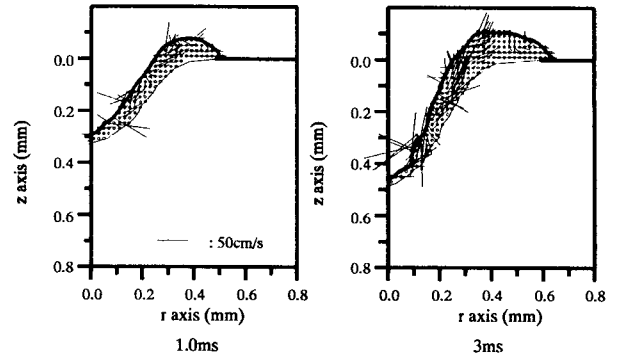


Fig.2 Surface profile and flow pattern for 500W laser

Fig.3 Surface profile and flow pattern for 2kW laser

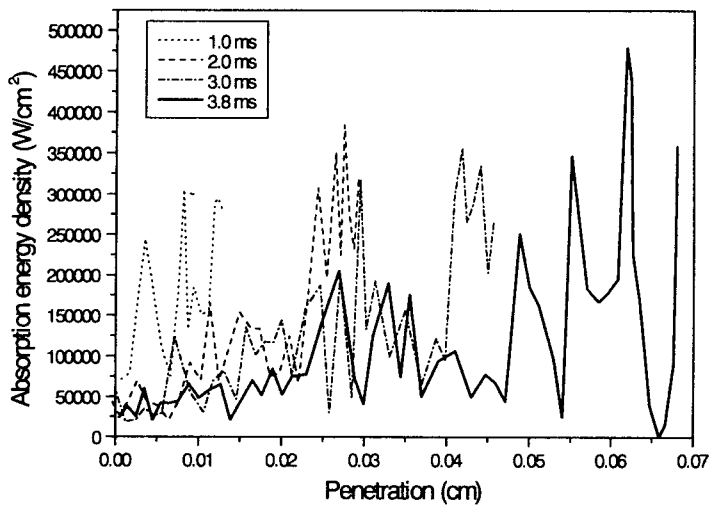


Fig.4 Absorption energy density for each time step penetration (laser power : 2kW)